

TEMA 10.- RODAMIENTOS

INTRODUCCIÓN

La ventaja más importante de los rodamientos radica en que el rozamiento inicial de arranque no es mucho mayor que en funcionamiento y además en que el coeficiente de rozamiento, salvo para valores extremos, varía poco con la carga y con la velocidad, lo cual, como se vio en el tema anterior no ocurre con los cojinetes.

Estas propiedades hacen a los rodamientos especialmente indicados para máquinas que arrancan y paran con frecuencia y que están sometidas a carga.

Entre sus características son de especial mención las siguientes: requieren poco lubricante, exigen poco mantenimiento, ocupan poco espacio axial, en cambio, son poco silenciosos, tienen una duración limitada y son caros.

La elección entre cojinetes y rodamientos es característica, en la mayoría de las ocasiones, del tipo de instalación, siendo imposible decir que un tipo es mejor que otro.

El cojinete exige su diseño y construcción por el ingeniero y en cambio el rodamiento es un elemento normalizado y de precisión que el proyectista sólo tiene que seleccionar de uno o varios catálogos con gran variedad de modelos y dimensiones, con la única condición de realizar una selección inteligente para la que precisa conocer las consideraciones básicas de cálculo.

Hoy hay tal estado de desarrollo y perfeccionamiento gracias a un largo periodo de investigación con fructíferos resultados.

CONSTRUCCIÓN. TIPOS DE RODAMIENTOS

Los rodamientos se pueden clasificar en dos tipos básicos:

- De bolas
- De rodillos

En ambos tipos se fabrican para soportar cargas radiales, axiales o una combinación de ambas.

Un rodamiento de bolas se compone de cuatro partes:

- Anillo interior
- Anillo exterior
- Bolas

- Jaula o separador

Para aumentar el área de contacto y permitir mayores cargas las bolas corren en muecas toroidales construidas en los anillos. El radio de estas muecas es ligeramente superior al de las bolas, habiendo un pequeño huelgo radial.

El objetivo del separador es el de mantener las bolas uniformemente separadas de forma que no se toquen entre sí.

La siguiente figura presenta un rodamiento de bolas con la nomenclatura de sus partes:

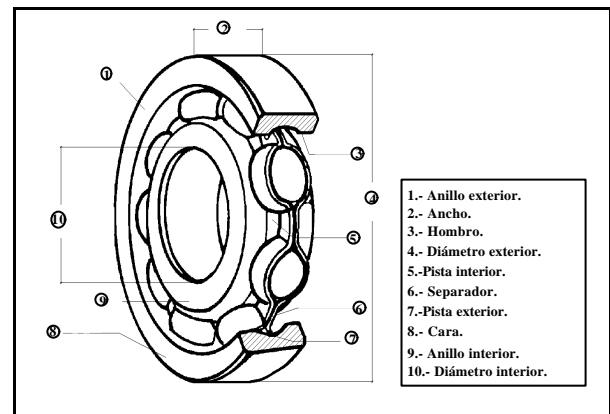


Figura 1.- Rodamiento de bolas. Nomenclatura

Se fabrican rodamientos de bolas de una amplia variedad y tamaño.

En la siguiente figura se presentan diversos tipos de rodamientos de bolas.

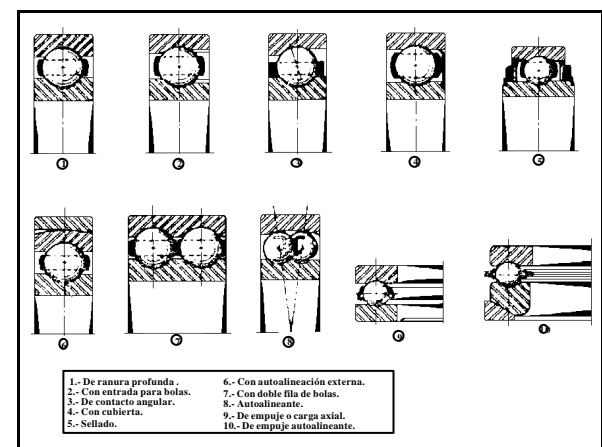


Figura 2.- Diversos tipos de rodamientos de bolas

Los rodamientos de ranura profunda y una sola hilera de bolas soportan carga radial y también cierta carga axial. Se construyen introduciendo las

bolas entre los anillos y colocándoles a continuación el separador que además de colocarlas equidistantes, impide que se salgan de sus pistas de rodadura.

Cuando se emplea una ranura para llenado de bolas, el número de estas que pueden introducirse entre los dos anillos es mayor. Con ello se consigue aumentar la capacidad de carga radial del rodamiento, sin embargo disminuye su capacidad de carga axial por el choque de las bolas contra los bordes de la ranura. Son los tipos 1 y 2 de la figura anterior.

Los rodamientos de *contacto angular* se caracterizan porque la conformación de sus pistas permite un gran empuje angular además del radial. Corresponden al tipo 3 de la figura anterior.

Hay un aspecto constructivo particularmente interesante y es el hecho de que en las caras de los rodamientos se pueden colocar cubiertas que ofrecen una buena protección contra el polvo y la suciedad. Se dice que son rodamientos sellados.

Cuando van sellados en ambas caras se lubrican en fábrica, y aunque se dice que están lubricados de por vida, a veces se instalan con un medio que permite su relubricación. Corresponden a los tipos 4 y 5 de la figura anterior.

Los rodamientos con *autoalineación externa* se utilizan cuando existe cierto grado de desalineamiento que los rodamientos de bolas no llegan a soportar. Corresponde al tipo 6 de la figura anterior.

Los rodamientos con *doble hilera de bolas* se utilizan cuando por razones de espacio no pueden montarse juntos dos rodamientos de una sola hilera de bolas. Dentro de este tipo de rodamientos se construye un interesante modelo de rodamiento autoalineante que soporta importantes desalineaciones de montaje. Corresponden a los tipos 7 y 8 de la figura anterior.

Los rodamientos de bolas para *empuje axial* exigen un montaje adecuado y solucionan montajes en los que se presentan primordialmente empujes axiales. Se construyen de muchos tipos y tamaños habiendo modelos incluso autoalineantes. Corresponden a los tipos 9 y 10 de la figura anterior.

En la siguiente figura se presentan los tipos más usuales de rodamientos de rodillos.

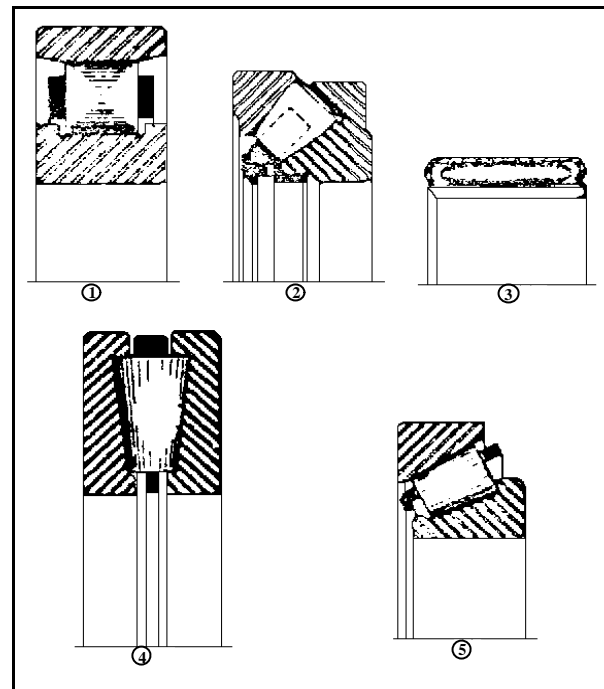


Figura 3.- Diversos tipos de rodamientos de rodillos

Los rodamientos de rodillos cilíndricos se caracterizan porque soportan más carga que los cojinetes de bolas del mismo tamaño debido a su mayor superficie de contacto, pero requieren una alineación de montaje casi perfecta y sin cargas axiales.

A veces cuando el espacio es limitado se pueden usar sólo los rodillos. Corresponde al tipo 1 de la figura anterior.

El rodamiento de *rodillos esféricos* se utiliza cuando hay grandes cargas y desalineamiento. Corresponde al tipo 2 de la figura anterior.

Los rodamientos de *rodillos cónicos* combinan las ventajas de los rodamientos de bolas y cilíndricos, soportando cargas axiales y radiales. Corresponde al tipo 4 de la figura.

Los rodamientos de *agujas* son muy útiles cuando se cuenta con un espacio radial limitado. Corresponde al tipo 3 de la figura anterior.

Los rodamientos *axiales de rodillos* tienen aplicaciones semejantes a los rodamientos axiales de bolas pero soportan más carga. Corresponde al tipo 5 de la figura anterior.

Por su espectacular conformación y por su específica aplicación se hace referencia para terminar este apartado a un rodamiento de bolas provisto de pistas de circulación conformadas en un manguito cilíndrico que permiten el desplazamiento alternativo de un eje.

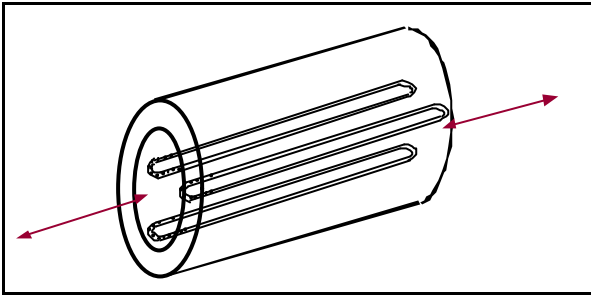


Figura 4.- Rodamiento para desplazamiento axial.

VIDA ÚTIL DE LOS RODAMIENTOS

Cuando las bolas o los rodillos ruedan sobre las pistas aparecen esfuerzos o tensiones variables en el tiempo que originan debido a las deformaciones variables fatigas que causan la rotura de los materiales y el fallo del rodamiento.

Se define como *vida útil* de un rodamiento el número total de revoluciones que soporta o el número total de horas de trabajo que aguanta a una velocidad constante, necesarias para que aparezcan fallos en el funcionamiento.

En condiciones normales de funcionamiento, es decir, evitando que entre suciedad y polvo en el rodamiento, la fatiga se manifiesta por agrietamiento o descascarillado de las superficies que soportan la carga y se considera que aparece un fallo cuando aparece la primera señal de fatiga.

Algunos fabricantes establecen que la fatiga se da cuando aparece fatiga en una superficie de $6'25 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$.

No obstante es importante señalar que el funcionamiento de un rodamiento puede prolongarse después de la vida útil.

Se define por *vida nominal* o *vida mínima* de un conjunto de cojinetes idénticos como el número de revoluciones o de horas de trabajo a una velocidad constante que pueden completar el 90 % del grupo de rodamientos antes de que aparezca en ellos el primer fallo.

Es fácil apreciar la importancia que tiene el conocer la duración probable de un cojinete o grupo de cojinetes.

La experiencia ha demostrado que la vida de un rodamiento en particular no puede predecirse, siendo también impredecible la vida mínima alcanzada por cualquier rodamiento de un grupo de ellos idénticos en ensayo.

Se define *carga básica* como la carga radial que un grupo de rodamientos idénticos con anillo

exterior fijo puede soportar para una vida de un millón de vueltas del anillo interior.

Experimentalmente la carga dinámica básica de un rodamiento se puede obtener por la ecuación de Palmgren:

$$C = 0'082 \cdot f_c \cdot (i \cdot \cos \alpha)^{0'7} \cdot Z^{2/3} \cdot D^{1'8} \cdot 10^4 \text{ Kp}$$

Siendo:

f_c = constante adimensional por la expresión $\frac{D \cdot \cos}{d_m}$

i = número de filas de bolas del rodamiento

α = ángulo nominal de contacto entre la línea de acción de la carga y un plano paralelo al rodamiento

Z = número de bolas por fila

D = diámetro de las bolas en cm.

d_m = diámetro medio de las pistas

C = carga dinámica básica en Kp.

Un hecho experimentalmente probado es que si se hacen rodar dos grupos de rodamientos idénticos bajo cargas diferentes C_1 y C_2 , sus vidas N_1 y N_2 son inversamente proporcionales a los cubos de las cargas:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{C_2^3}{C_1^3}$$

(En los rodamientos de rodillos son inversamente proporcionales a las cargas elevadas a 10/3).

Si una de las dos cargas es la denominada carga dinámica básica C , el número de vueltas que le corresponde es de 1.000.000 \Rightarrow

$$\frac{N_1}{1.000.000} = \frac{C^3}{C_1^3}$$

ESFUERZOS DURANTE LA RODADURA

Debido a que la superficie de las bolas en contacto con las pistas es muy pequeña, reducidas cargas en los rodamientos ocasionan esfuerzos o tensiones muy elevadas. Pero gracias a la curvatura de los caminos de rodadura de las bolas la superficie de contacto real es mayor que la que en un principio podría preverse. A pesar de ello debido a la reiteración de cargas y descargas se producen fallos por fatiga. Es curioso observar que cuando las velocidades de giro son elevadas comienzan a tener importancia las fuerzas centrífugas.

Cuando el rodamiento está en reposo una carga elevada puede producir una deformación permanente. Se puede considerar la deformación como huellas, cuyo acto de formación se llama brinelación, de las cuales es importante saber su cuantificación antes de que el rodamiento quede inservible. Una deformación del orden de $0'25 \mu$ se puede detectar visualmente, pero el efecto de una brinelación no es molesto hasta que la deformación es del orden de $2'5 \mu$.

La firma S.K.F. recomienda que las deformaciones permanentes sean menores que 10^{-4} veces el diámetro de las bolas.

La capacidad de carga estática radial de un rodamiento se calcula por la fórmula de *Stribeck*:

$$C_0 = C_s \cdot Z \cdot D^2$$

Siendo:

C_0 = capacidad de carga estática
 C_s = coeficiente característico del rodamiento
 Z = número de bolas
 D = diámetro de bolas en cm.

(En rodamientos de una sola hilera de bolas el coeficiente del rodamiento es $C_s = 352$).

Generalmente los catálogos ofrecen los valores de C_0 .

Como un rodamiento falla por fatiga debida a la rodadura, la capacidad de carga dinámica es diferente de la capacidad de carga estática.

La capacidad de carga dinámica se calcula mediante la fórmula de Palmgren anteriormente expuesta.

SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

Antes de proceder a presentar la metodología para la selección del tipo y tamaño del rodamiento necesario en una instalación se exponen una serie de normas generales para su selección:

- Para pequeños montajes, normalmente se emplean rodamientos de bolas.

- Para soportes de grandes dimensiones y fuertemente cargados, deben emplearse rodamientos de rodillos.

- Los rodamientos rígidos de bolas son apropiados para velocidades elevadas de giro y,

aunque son radiales, soportan empujes axiales relativamente importantes.

- Los rodamientos de bolas de contacto angular, los de rodillos a rótula y rodillos cónicos son propios para esfuerzos radiales y, al mismo tiempo, pueden soportar importantes empujes axiales.

- Los rodamientos de rodillos cilíndricos no soportan esfuerzos axiales; solamente pueden soportar grandes esfuerzos radiales.

- Los rodamientos axiales de bolas solamente soportan esfuerzos axiales.

- Los rodamientos axiales de rodillos a rótula pueden soportar cargas importantes axiales y radiales.

El cálculo de las dimensiones de un rodamiento según la forma de trabajo puede hacerse para cargas dinámicas y estáticas.

La carga es dinámica si el rodamiento gira constantemente. La carga se considera estática, cuando el rodamiento está en reposo o ejecuta movimientos muy lentos de giro o vaivén.

El tamaño de un rodamiento se determina para cargas dinámicas con la fórmula:

$$C = \frac{f_L}{f_n \cdot f_t} \cdot F$$

Siendo:

C = capacidad de carga dinámica en Kp ofrecida en catálogo para cada rodamiento
 f_L = coeficiente de esfuerzos dinámicos
 f_n = coeficiente de velocidad; depende únicamente del número de revoluciones. Se establecen dos grupos según se trate de rodamientos de bolas o de rodillos.
 f_t = coeficiente de temperatura de servicio
 F = carga dinámica equivalente en kp.

Cuando se trata de rodamientos solicitados estáticamente, la fórmula anterior se transforma en:

$$C_0 = f_s \cdot F_0$$

Siendo:

C_0 = capacidad de carga estática en kgf indicada en las tablas para cada rodamiento
 f_s = coeficiente de esfuerzos estáticos
 F_0 = carga estática equivalente en kp.

Volviendo a la sollicitación dinámica es necesario, en todos los casos, calcular la carga dinámica equivalente F_d , que se puede definir como una carga radial o axial hipotética, constante en magnitud y dirección, cuyos efectos sobre el rodamiento serían los mismos que las cargas reales.

La siguiente tabla ofrece los valores del coeficiente de esfuerzos dinámicos f_L según el tipo de montaje y de las clases de esfuerzo:

<i>Lugar de montaje</i>	<i>f_L</i>	<i>Lugar de montaje</i>	<i>f_L</i>
Maquinaria en general		Engranajes	
Trenes de laminación	2.0-2.5	Engranajes universales pequeños	2.5-3.5
Rodamientos de empuje para barcos	2.9-3.6	Engranajes univ. de tipo medio	3.0-4.0
Rodamientos de ejes propulsores de hélices de barcos	> 6.0	Grandes engranajes para barcos	2.6-4.0
Ventiladores pequeños	2.5-3.5	Engranajes para vehículos sobre carriles	3.5-4.5
Ventiladores de tipo medio	3.0-4.5	Engranajes para laminadores	3.0-5.0
Ventiladores grandes	4.5-5.5	Vehículos	
Bombas centrífugas	2.5-4.5	Motocicletas	1.4-1.9
Centrifugadoras	3.0-4.0	Coches ligeros	1.6-2.1
Poleas para cables de extracción	4.5-5.0	Coches pesados	1.7-2.2
Rodillos para cinta transportadora	3.0-4.5	Camiones ligeros	1.7-2.2
Draga de rueda de paletas, rueda de paletas y elevador	> 6.0	Camiones pesados	2.0-2.6
Machacadoras de piedra	3.0-3.5	Autobuses	2.0-2.6
Molinos batidores	3.5-4.5	Tractores	1.6-2.2
Cribas vibratorias	2.5-2.8	Vehículos a orugas	2.1-2.7
Grandes apisonadoras vibratorias	1.6-2.0	Ruedas delanteras	
Excitadores excéntricos		Cajas de cambio	
Aparatos vibratorios	1.0-1.5	Eje de transmisión	
Prensa para briquetas	4.5-5.0	Motores eléctricos	
Grandes batidoras	3.5-4.0	Motores para aparatos electrodomésticos	1.5-2.0
Molinos de tubos	> 6.0	Motores pequeños de serie	2.5-3.5
Rodillos para hornos giratorios	4.5-5.0	Motores de tipo medio de serie	3.0-4.0
Tornos, fresadoras y taladradoras	2.7-4.5	Grandes motores estacionarios	3.5-4.5
Rectificadoras, lapeadoras y pulidoras	2.7-4.5	Motores eléctricos de tracción	3.0-4.0
Volantes	3.4-4.0	Cajas de grasa	
Maquinaria de imprenta	4.0-4.5	Vagonetas	3.0-4.0
Maquinas para la fabricación de papel	5.0-6.0	Tranvías	4.5-5.5
Máquinas para trabajar la madera	3.0-4.0	Coches de viajeros	4.0-5.0
Maquinaria textil	3.6-4.7	Vagones de mercancías	3.5-4.0
Máquinas para fundición centrifugada	3.4-4.0	Vagones de descombro	3.5-4.0
		Automotores	4.0-5.0
		Locomotoras	4.0-5.5
		(rodamientos exteriores)	
		Locomotoras	4.5-5.5
		(rodamientos interiores)	

Tabla 1.- Coeficiente de esfuerzo dinámico f_L según el tipo de montaje y clases de esfuerzo.

La siguiente tabla representa el coeficiente de velocidad f_n para rodamientos de bolas en función del régimen de giro en r.p.m.

<i>n</i> <i>r.p.m.</i>	<i>f_n</i>	<i>n</i> <i>r.p.m.</i>	<i>f_n</i>	<i>n</i> <i>r.p.m.</i>	<i>f_n</i>	<i>n</i> <i>r.p.m.</i>	<i>f_n</i>	<i>n</i> <i>r.p.m.</i>	<i>f_n</i>
10	1.494	100	0.693	450	0.420	2100	0.251	8200	0.160
12	1.405	105	0.682	460	0.417	2200	0.247	8400	0.158
14	1.335	110	0.672	470	0.414	2300	0.244	8600	0.157
16	1.277	115	0.662	480	0.411	2400	0.240	8800	0.156
18	1.228	120	0.652	490	0.408	2500	0.237	9000	0.155
20	1.186	125	0.644	500	0.406	2600	0.234	9200	0.154
22	1.148	130	0.635	520	0.400	2700	0.231	9400	0.153
24	1.116	135	0.627	540	0.395	2800	0.228	9600	0.152
26	1.086	140	0.620	560	0.390	2900	0.226	9800	0.150
28	1.060	145	0.613	580	0.386	3000	0.223	10000	0.149
30	1.036	150	0.606	600	0.382	3100	0.221	10500	0.147
32	1.014	155	0.599	620	0.378	3200	0.218	11000	0.145
34	0.994	160	0.593	640	0.374	3300	0.216	11500	0.143
36	0.975	165	0.586	660	0.370	3400	0.214	12000	0.141
38	0.958	170	0.581	680	0.366	3500	0.212	13000	0.137
40	0.941	175	0.575	700	0.363	3600	0.210	14000	0.134
42	0.926	180	0.570	720	0.359	3700	0.208	15000	0.131
44	0.912	185	0.565	740	0.356	3800	0.206	16000	0.128
46	0.898	190	0.560	760	0.353	3900	0.205	17000	0.125
48	0.885	195	0.555	780	0.350	4000	0.203	18000	0.123
50	0.874	200	0.550	800	0.347	4100	0.209	19000	0.121
52	0.863	210	0.541	820	0.344	4200	0.199	20000	0.119
54	0.851	220	0.533	840	0.341	4300	0.198		
56	0.841	230	0.525	860	0.339	4400	0.196		
58	0.831	240	0.518	880	0.336	4500	0.195		
60	0.822	250	0.511	900	0.333	4600	0.193		
62	0.813	260	0.504	920	0.331	4700	0.192		
64	0.805	270	0.498	940	0.329	4800	0.191		
66	0.797	280	0.492	960	0.326	4900	0.190		
68	0.788	290	0.487	980	0.324	5000	0.188		
70	0.781	300	0.481	1000	0.322	5200	0.186		
72	0.774	310	0.476	150	0.317	5400	0.183		
74	0.767	320	0.471	1100	0.312	5600	0.181		
76	0.760	330	0.466	11150	0.307	5800	0.179		
78	0.753	340	0.461	1200	0.303	6000	0.177		
80	0.747	350	0.457	1300	0.295	6200	0.175		
82	0.741	360	0.453	1400	0.288	6400	0.173		
84	0.735	370	0.448	1500	0.281	6600	0.172		
86	0.729	380	0.444	1600	0.275	6800	0.170		
88	0.724	390	0.441	1700	0.270	7000	0.168		
90	0.718	400	0.437	1800	0.265	7200	0.167		
92	0.713	410	0.433	1850	0.262	7400	0.65		
94	0.708	420	0.430	1900	0.260	7600	0.164		
96	0.703	430	0.426	1950	0.258	7800	0.162		
98	0.698	440	0.423	2000	0.255	8000	0.161		

Tabla 2.- Coeficiente de velocidad para rodamientos de bolas f_n .

La siguiente tabla presenta el coeficiente de velocidad f_v para rodamientos de rodillos en función del régimen de giro en r.p.m.

<i>n</i> r.p.m.	<i>fn</i>	<i>n</i> r.p.m.	<i>fn</i>	<i>n</i> r.p.m.	<i>fn</i>	<i>n</i> r.p.m.	<i>fn</i>	<i>n</i> r.p.m.	<i>fn</i>
10	1.435	100	0.719	450	0.458	2100	0.289	8200	0.192
12	1.359	105	0.709	460	0.455	2200	0.285	8400	0.190
14	1.297	110	0.699	470	0.452	2300	0.281	8600	0.189
16	1.246	115	0.690	480	0.449	2400	0.277	8800	0.188
18	1.203	120	0.681	490	0.447	2500	0.274	9000	0.187
20	1.166	125	0.673	500	0.444	2600	0.271	9200	0.185
22	1.133	130	0.665	520	0.439	2700	0.268	9400	0.184
24	1.104	135	0.657	540	0.434	2800	0.265	9600	0.183
26	1.077	140	0.650	560	0.429	2900	0.262	9800	0.182
28	1.054	145	0.643	580	0.425	3000	0.259	10000	0.181
30	1.032	150	0.637	600	0.420	3100	0.257	10500	0.178
32	1.012	155	0.631	620	0.416	3200	0.254	11000	0.176
34	0.994	160	0.625	640	0.412	3300	0.252	11500	0.173
36	0.977	165	0.619	660	0.408	3400	0.250	12000	0.171
38	0.962	170	0.613	680	0.405	3500	0.248	13000	0.167
40	0.947	175	0.608	700	0.401	3600	0.246	14000	0.163
42	0.933	180	0.603	720	0.398	3700	0.43	15000	0.160
44	0.920	185	0.598	740	0.395	3800	0.242	16000	0.157
46	0.908	190	0.593	760	0.391	390	0.240	17000	0.154
48	0.896	195	0.589	780	0.388	4000	0.238	18000	0.152
50	0.886	200	0.584	800	0.385	4100	0.236	19000	0.149
52	0.875	210	0.576	820	0.383	4200	0.234	20000	0.147
54	0.865	220	0.568	840	0.380	4300	0.233		
56	0.856	230	0.560	860	0.377	4400	0.231		
58	0.847	240	0.553	880	0.375	4500	0.230		
60	0.838	250	0.546	900	0.372	4600	0.228		
62	0.830	260	0.540	920	0.370	4700	0.227		
64	0.822	270	0.534	940	0.367	4800	0.225		
66	0.815	280	0.528	960	0.365	4900	0.224		
68	0.807	290	0.523	980	0.363	5000	0.222		
70	0.800	300	0.517	1000	0.361	5200	0.220		
72	0.794	310	0.512	150	0.355	5400	0.217		
74	0.787	320	0.507	1100	0.350	5600	0.215		
76	0.781	330	0.503	11150	0.346	5800	0.213		
78	0.775	340	0.498	1200	0.341	6000	0.211		
80	0.769	350	0.494	1300	0.333	6200	0.209		
82	0.763	360	0.490	1400	0.326	6400	0.207		
84	0.758	370	0.486	1500	0.319	6600	0.205		
86	0.753	380	0.482	1600	0.313	6800	0.203		
88	0.747	390	0.478	1700	0.307	7000	0.201		
90	0.742	400	0.475	1800	0.302	7200	0.199		
92	0.737	410	0.471	1850	0.300	7400	0.198		
94	0.733	420	0.467	1900	0.297	7600	0.196		
96	0.728	430	0.464	1950	0.295	7800	0.195		
98	0.724	440	0.461	2000	0.293	8000	0.193		

Tabla 3.- Coeficiente de velocidad para rodamientos de rodillos f_v

La tabla siguiente presenta el coeficiente de temperatura de servicio del rodamiento f_t :

temperatura máxima de servicio	150°C	200°C	250°C	300°C
factor de temperaturas f_t	1'00	0'90	0'75	0'90

Tabla 4.- Coeficiente de temperatura de servicio f_t

El cálculo de F se realiza mediante la ecuación:

$$F = X \cdot F_r + Y \cdot F_a$$

Siendo:

F_r = carga radial en Kp

F_a = carga axial en Kp

X = coeficiente radial del rodamiento

Y = coeficiente axial del rodamiento

Para cuantificar X e Y se usan tablas ofrecidas por las firmas constructoras en las que es preciso tener en cuenta que la carga axial F_a no se considera hasta que la relación F_a/F_r supera un cierto valor e. El valor de e viene normalmente expresado en dichas tablas para los diferentes valores de F_a/Co .

La siguiente tabla de la firma S.K.F. ofrece los valores de X e Y de rodamientos.

Rodamientos de bolas					
Tipos de rodamientos	$\frac{F_a}{F_r} \leq e$ $\frac{F_a}{F_r} > e$				e
	X	Y	X	Y	
Rodamientos rígidos de bolas Series EL, R, 160,60, 62, 63, 64, $\frac{F_a}{Co} = 0'025$ $= 0'04$ $= 0'07$ $= 0'13$ $= 0'25$ $= 0'5$				2	0'22
Rodamiento de bolas a rótula 135, 126, 127, 108, 129	1	1'8	0'65	2'8	0'34
1200-1203		2		3'1	0'31
04-05		2'3		3'6	0'27
06-07		2'7		4'2	0'23
08-09	1	2'9	0'65	4'5	0'21
10-12		3'4		5'2	0'19
13-22		3'6		5'6	0'17
24-30		3'3		5	0'2
2200-2204		1'3		2	0'5
05-07		1'7		2'6	0'37
08-09		2		3'1	0'31
10-13	1	2'3	0'65	3'5	0'28
14-20		2'4		3'8	0'26

Rodamientos de bolas					
Tipos de rodamientos	$\frac{F_a}{F_r} \leq e$ $\frac{F_a}{F_r} > e$				e
	X	Y	X	Y	
21-22		2'3		3'5	0'28
1300-1303		1'8		2'8	0'34
04-05		2'2		3'4	0'29
06-09	1	2'5	0'65	3'9	0'25
10-22		2'8		4'3	0'23
2301		1		1'6	0'63
2302-2304		1'2		1'9	0'52
05-10	1	1'5	0'65	2'3	0'43
11-18		1'6		2'5	0'39
Rodamientos de bolas con contacto angular Series 72 B, 73 B Series 72 BG, 73 BG Un par de rodamientos en montaje en el mismo sentido	1	0	0'35	0'57	1'14
Un par de rodamientos en montaje 0 o X Series 32 A, 33A	1	0'55	0'57	0'93	1'14
	1	0'73	0'62	1'17	0'86

Rodamientos de rodillos					
Tipos de rodamientos	$\frac{F_a}{F_r} \leq e$ $\frac{F_a}{F_r} > e$				e
	X	Y	X	Y	
Rodamientos de rodillos a rótula					
23944-239/670	1	3'7	0'67	5'5	0'18
239/710-239/950		4		6	0'17
23024C-23068 CA	1	2'9	0'67	4'4	0'23
23072CA-230/500CA		3'3		4'9	0'21
24024C-24080 CA	1	2'3	0'67	3'5	0'29
24084CA-240/500CA		2'4		3'6	0'28
23120C-23128 C	1	2'4	0'67	3'6	0'28
23130 C-231/500 CA		2'3		3'5	0'29
24122C-24128C		1'9		2'9	0'35
24130C-24172 CA	1	1'8	0'67	2'7	0'37
24176CA-241/500CA		1'9		2'9	0'35
22205C-22270 C		2'1		3'1	0'32
08C- 09 C		2'5		3'7	0'27
10C- 20 C	1	2'9	0'67	4'4	0'23
22C- 44 C		2'6		3'9	0'26
48 - 64		2'4		3'6	0'28
23218C-23220 C		2'2		3'3	0'31
22C- 64 CA	1	2	0'67	3	0'34
21304-21305		2'8		4'2	0'24
06- 10		3'2		4'8	0'21
11- 19	1	3'4	0'67	5	0'2
20- 22		3'7		5'5	0'18
22308C-22310 C		1'8		2'7	0'37
11C- 15 C		1'9		2'9	0'35
16C- 40 C	1	2	0'67	3	0'34
44 - 56		1'9		2'9	0'35
rodamientos de rodillos cónicos					
30203-30204				1'75	0'34
05-08				1'6	0'37
09-22	1	0	0'4	1'45	0'41
24-30				1'35	0'44
32206-32208				1'6	0'37
09-22	1	0	0'4	1'45	0'41

Rodamientos de rodillos					
Tipos de rodamientos	$\frac{F_a}{F_r} \leq e$ $\frac{F_a}{F_r} > e$				e
	X	Y	X	Y	
24-30				1'35	0'44
30302-30303				2'1	0'28
04-07	1	0	0'4	1'95	0'31
08-24				1'75	0'34
31305-31318	1	0	0'4	0'73	0'82
32303				2'1	0'28
32304-32307	1	0	0'4	1'95	0'31
08-24				1'75	0'34

Tabla 5.- Coeficientes radial y axial tabulados.

Menos precisa, pero práctica y utilizable es la tabla siguiente:

Tipo de rodamiento	X1	Y1	X2	Y2
De contacto radial	1	0	0'5	1'4
De contacto angular suave	1	1'25	0'45	1'2
De contacto angular fuerte	1	0'75	0'4	0'75
De doble fila				

Tabla 6.- Coeficientes radial y axial simplificados.

Como se observa en la tabla se ofrecen dobles parejas de valores X₁, Y₁ y X₂, Y₂, para su utilización se calculará F con ambas parejas y se usará el mayor valor obtenido.

Entre la carga y la duración de los rodamientos se expresó una relación.

Dicha relación se puede presentar por:

$$L = \frac{C}{F} \cdot \frac{C}{F} \cdot \frac{P}{F} \equiv \frac{C}{F} = L^{1/P}$$

Siendo:

L= duración nominal expresada en millones de revoluciones

C = capacidad de carga base del rodamiento en Kp

F = carga equivalente sobre el rodamiento en Kp

C/F = seguridad de carga

$$P = \begin{cases} 3 & \text{en rodamientos de bolas} \\ 10/3 & \text{en rodamientos de rodillos} \end{cases}$$

A título orientativo y para asentamiento de los conocimientos expuestos se presentan a continuación algunos ejemplos prácticos, para los cuales se ofrecen las tablas de S.K.F. de datos de rodamientos de bolas de las series 62 y 63.

Rod. números	Milímetros				Capacidad de base en kgf		Velocidad máxima
	d	D	B	r	Estática Co	Dinámica a C	
6200	10	30	9	1	224	400	20000
01	12	32	10	1	300	540	20000
02	15	35	11	1	355	610	16000
6203	17	40	12	1	440	750	16000
04	20	47	14	1'5	655	1000	16000
05	25	52	15	1'5	710	1100	13000
6206	30	62	16	1'5	1000	1530	13000
07	35	72	17	2	1370	2000	10000
08	40	80	18	2	1600	2280	10000
6209	45	85	19	2	1830	2550	8000
10	50	90	20	2	2120	2750	8000
11	55	100	21	2'5	2600	3400	8000
6212	60	110	22	2'5	3200	4050	6000
13	65	120	23	2'5	3550	4400	6000
14	70	125	24	2'5	3900	4800	5000
6215	75	130	25	2'5	4250	5200	5000
16	80	140	26	3	4550	5700	5000
17	85	150	28	3	5500	6550	4000
6218	90	160	30	3	6300	7500	4000
19	95	170	32	3'5	7200	8500	4000
20	100	180	34	3'5	8150	9650	3000
6221	105	190	36	3'5	9300	10400	3000
22	110	200	38	3'5	10400	11200	3000
24	120	215	40	3'5	10400	11400	3000
6226	130	230	40	4	11600	12200	2500
28	140	250	42	4	12900	12900	2500
30	150	270	45	4	14300	13700	2500
32	160	290	48	4	15600	14300	2000
6234	170	310	52	5	19000	16600	2000
36	180	320	52	5	20400	17600	1600
38	190	340	55	5	24000	20000	1600
40	200	360	58	5	26500	21200	1600

Tabla 7.- Características de los rodamientos de bolas de la serie 62 de S.K.F.

Rod. números	Milímetros				Capacidad de base en kgf		Velocidad máxima permitida r.p.m.
	d	D	B	r	Estática Co	Dinámica a C	
6300	10	35	11	1	360	630	16000
01	12	37	12	1'5	430	765	16000
02	15	42	13	1'5	520	880	16000
6303	17	47	14	1'5	630	1060	13000
04	20	52	15	2	765	1250	13000
05	25	62	17	2	1040	1660	10000
6306	30	72	19	2	1460	2200	10000
07	35	80	21	2'5	1760	2600	8000
08	40	90	23	2'5	2200	3200	8000
6309	45	100	25	2'5	3000	4150	8000
10	50	110	27	3	3550	4800	6000
11	55	120	29	3	4250	5600	6000
6312	60	130	31	3'5	4800	6400	5000
13	65	140	33	3'5	5500	7200	5000
14	70	150	35	3'5	6300	8150	5000
6315	75	160	37	3'5	7200	9000	4000
16	80	170	39	3'5	8000	9650	4000
17	85	180	41	4	8800	10400	4000
6318	90	190	43	4	9800	11200	3000
19	95	200	45	4	11200	12000	3000
20	100	215	47	4	13200	13700	3000
6321	105	225	49	4	14300	14300	2500
22	110	240	50	4	16600	16000	2500
24	120	260	55	4	17000	16300	2500
6326	130	280	58	5	19600	18000	2500
28	140	300	62	5	22400	20000	2000
30	150	320	65	5	25500	21600	2000

Tabla 8.- Características de los rodamientos de bolas de la serie 63 de S.K.F.

Problema 1º

¿Que duración nominal, en horas de funcionamiento, puede alcanzar un rodamiento rígido de bolas modelo 6308, siendo la carga radial constante $F_r = 280$ kgf y la velocidad 800 r.p.m.? (fig. 7.36).

Solución:

Dado que no se ejerce ninguna carga axial sobre el rodamiento, la carga equivalente $F = F_r = 280$ kgf.

Según la tabla 8, la capacidad de base dinámica C es de 3200 kgf y la seguridad de carga es, pues:

$$\frac{C}{F} = \frac{3200}{280} = 11'4$$

Según se vio:

$$L = \frac{C}{F} \cdot 10^6 \Rightarrow L = 11'4^3 \text{ millones de revoluciones}$$

por tanto:

$$L = 1481'5 \text{ millones de revoluciones.}$$

Por una sencilla regla de tres se tiene:

$$\begin{array}{l} 800 \text{ revol} \quad \text{_____} \quad 1 \text{ minuto} \\ 1481'5 \cdot 10^6 \text{ revol} \quad \text{_____} \quad X \Rightarrow \end{array}$$

$$X = 31000 \text{ horas}$$

Problema 2º

Sobre el rodamiento 6308 del problema anterior se ejerce además de la carga radial $F_r = 280$ kgf una carga axial $F_a = 170$ kgf. ¿Que duración puede alcanzar?

Solución

Se obtiene la relación F_a/C_o y dado que la capacidad de base estática del rodamiento es $C_o = 2200$ kgf, se tiene:

$$\frac{F_a}{C_o} = \frac{170}{2200} = 0'077$$

Con $F_a/C_o = 0'077$ se tiene $e = 0'27$ y como $F_a/F_r \geq e$ según la tabla 5 se tiene $X = 0'56$ e $Y = 1'6$.

Así sucede en este caso porque:

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{170}{280} = 0'61$$

Según la ecuación, la carga equivalente sobre el rodamiento es:

$$F = 0'56 \cdot 280 + 1'6 \cdot 170 = 429 \text{ kgf}$$

Y la seguridad de carga:

$$\frac{C}{F} = \frac{3200}{429} = 7'46$$

$$L = \frac{C}{F} \cdot 10^6 \Rightarrow L = 415 \cdot 10^6 \text{ revoluciones}$$

Si

$$\begin{array}{l} 800 \text{ revol} \quad \text{_____} \quad 1 \text{ minuto} \\ 415 \cdot 10^6 \text{ revol} \quad \text{_____} \quad X \Rightarrow \end{array}$$

$$X = 8650 \text{ horas}$$

Problema 3º

Elegir un rodamiento rígido de bolas para soportar una carga radial $F_r = 525$ kgf a 1000 revoluciones por minuto. La duración debe alcanzar 20000 horas de funcionamiento.

Solución

Dado que no se ejerce ninguna carga axial sobre el rodamiento, la carga equivalente $F = F_r = 525$ kgf.

Como debe durar 20000 horas de funcionamiento se le pedirán:

$$L = 20000 \cdot 60 \cdot 1000 \text{ revoluciones}$$

$$L = 1200 \cdot \text{Millones de revoluciones}$$

Como:

$$L = \frac{C}{F} \cdot 10^6 \Rightarrow \frac{C}{F} = 10'6$$

Como:

$$F = 525 \text{ Kp} \Rightarrow C = 5565 \text{ Kp}$$

En la tabla 7 se observa que el rodamiento 6216 con una capacidad de carga básica de $C = 5700$ Kp, soportaría las condiciones expuestas.

También sería utilizable el rodamiento 6311 de la tabla 8.

Problema 4º

Se quiere escoger un rodamiento rígido de bolas que a 1600 revoluciones por minuto, soporte una carga radial $F_r = 220$ kgf y una carga axial $F_a = 45$

kgf. Se desea una duración nominal de 10000 horas de funcionamiento.

1ª forma de solución

El número total de revoluciones giradas por el rodamiento durante toda su vida útil es:

$$L = 10000 \cdot 60 \cdot 1600 = 960 \cdot 10^6 \text{ revol.}$$

$$L = 960 \text{ Mrevol}$$

Se sabe que:

$$L = \frac{C^3}{F^3} \cdot P$$

F según la tabla 6 toma dos valores:

$$F = 1 \cdot 220 + 0 \cdot 45 \text{ Kp} = 220 \text{ Kp} \text{ o bien } F = 0'5 \cdot 220 + 1'4 \cdot 45 \text{ Kp} = 173 \text{ Kp}$$

De ambas soluciones se toma la más desfavorable $F = 220 \text{ Kp}$, por lo que:

$$960 = \frac{C^3}{220^3} \Rightarrow C = 2170 \text{ Kp}$$

para esta carga podría usarse según la tabla 7 un rodamiento S.K.F. 6208.

2ª forma de solución

Se sabe que

$$e = \frac{F_a}{F_r} \Rightarrow e = \frac{45}{220} = 0'204$$

Según la tabla 5, $e <$ el más pequeño de los valores correspondientes al tipo de rodamiento elegido, por lo que $X = 1$ e $Y = 0 \Rightarrow$

Como:

$$F = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \Rightarrow F = 220 \text{ Kp}$$

El número de vueltas que dará el rodamiento en su vida útil será:

$$L = 10000 \cdot 60 \cdot 1600 \text{ revol} = 960 \text{ Mrevol}$$

$$L = 960 \text{ Mrevol}$$

Como:

$$L = \frac{C^3}{F^3} \cdot P \Rightarrow C = 2170 \text{ Kp}$$

Por lo que según la tabla 7 se puede elegir un rodamiento S.K.F. 6208.

MONTAJE Y MANTENIMIENTO DE RODAMIENTOS

En lo que sigue se van a ofrecer unas nociones muy interesantes, recomendadas por las firmas fabricantes de rodamientos, relativas al montaje y mantenimiento de los rodamientos.

- Cuidese de la limpieza de los rodamientos: el polvo y otras suciedades pueden estropearlos rápidamente. Manténgase, pues, el rodamiento embalado hasta el momento de montarlo.

- Elijanse ajustes correctos para el rodamiento. Para ello, conviene atenerse a las recomendaciones de las casas fabricantes. En general, hay que decir que, si el eje es giratorio y el soporte estacionario, debe montarse el aro interior con ajuste fuerte. Si por el contrario, el soporte es giratorio y el eje fijo, es el aro exterior el que debe montarse con ajuste fuerte.

- Al mecanizar el eje no debe emplearse el rodamiento como calibre, pues el ajuste puede resultar incorrecto y, además, se corre el riesgo de que penetren virutas o suciedad en el interior del rodamiento. Es mucho mejor utilizar un micrómetro o pálmer o un calibre de tolerancia.

- El montaje de un rodamiento en el eje se efectúa empleando un tubo en cuyo extremo se coloca un plano sobre el cual se golpea ligeramente. El tubo debe apoyarse únicamente en la pista interior. Se facilita el montaje, si previamente se calienta el rodamiento en un baño de aceite mineral hasta 80°C. Si se monta el rodamiento sobre el eje, dando golpes sobre el aro exterior, puede dañarse porque las bolas pueden quedar marcadas en los caminos de rodadura.

- Si el aro exterior es fijo, con frecuencia se monta el rodamiento a mano o con ligera presión. Si es giratorio, y por tanto debe montarse con ajuste fuerte, el empuje se ha de aplicar únicamente sobre el aro exterior.

- A fin de facilitar el desmontaje, el resalte del eje no debe hacerse demasiado grande. En muchos casos será necesario proveer al eje de unas entalladuras que permitan el uso de un extractor.

Precauciones semejantes se habrán de tomar en el alojamiento del aro exterior, cuando éste deba ser montado con ajuste fuerte.

- Para desmontar el rodamiento, si es posible, se empleará un extractor al efecto.

Otra manera de desmontarlo es apoyar el aro interior en un soporte adecuado y desmontar el eje, dando golpes en su extremo, pero interponiendo entre el eje y el martillo una barra de bronce de diámetro adecuado. Debe procurarse que el aro interior apoye uniformemente sobre el soporte. Jamás se empleará el cincel para desmontar rodamientos pues el cincel puede arrancar fragmentos y, además puede dañar el eje produciendo resaltes que impedirán después el correcto ajuste.

- En cuanto a la lubricación y mantenimiento de los rodamientos, en general es preferible lubricar los rodamientos con grasa. Sin embargo, se emplea también el aceite, por ejemplo, para altas velocidades, o cuando la máquina tiene lubricación general por aceite. Los rodamientos axiales de rodillos a rótula se lubrican con aceite casi siempre.

Si se lubrica el rodamiento con grasa, no debe llenarse el soporte más de los $\frac{2}{3}$ de su capacidad, pues un exceso de grasa puede causar el calentamiento del rodamiento; debe usarse grasa apropiada para rodamientos.

Si se usa aceite, el nivel superior del mismo debe estar situado un poco más bajo que el centro del rodillo inferior.

La mayoría de los rodamientos de bolas y muchos de los de rodillos en los que se utiliza la grasa, no necesitan lubricarse más que una o dos veces al año. Con velocidades elevadas han de ser lubricados a intervalos mucho más cortos.

Con aceite, los intervalos deben ser también mucho más cortos.

Para trabajo duro, será necesario, en muchos casos, emplear lubricación continua.

Los rodamientos deben ser limpiados y revisados periódicamente. Si el rodamiento está sometido a una carga elevada, convendrá hacer esta operación una vez al año.

Para limpiar los rodamientos se puede emplear gasolina o, mejor, petróleo de buena calidad. Después de lavados, deben ser engrasados y montados en seguida, haciéndolos girar unas cuantas vueltas para que el lubricante penetre por todo el rodamiento, sobre todo si han de estar cierto tiempo sin funcionar.